

Primljen / Received: 10.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 16.4.2018.

Prihvaćen / Accepted: 12.6.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2018.

Metoda N2 za projektiranje zgrada

Autori:

Adriana Cerovečki, mag.ing.aedif.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet
acerovecki@gfos.hr

Doc.dr.sc. **Ivan Kraus**, dipl.ing.građ.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet
ikraus@gfos.hr

Prof.dr.sc. **Dragan Morić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet
dmoric@gfos.hr

Pregledni rad

Adriana Cerovečki, Ivan Kraus, Dragan Morić

Metoda N2 za projektiranje zgrada

N2 je brza nelinearna statička metoda za projektiranje zgrada otpornih na potres. Rad predstavlja značajke i ograničenja metode, njezin razvoj te mogućnosti primjene na različitim tipovima zgrada. Istaknute su razlike između klasične N2 metode i njezinih proširenja. Također, dana je usporedba N2 metode i sličnih proračunskih pristupa. Ustanovljeno je da se rezultati dobiveni proračunima uz primjenu N2 metode dobro slažu s rezultatima dobivenim uz primjenu znatno složenijih metoda. Na kraju su dane smjernice za daljnje istraživanje.

Ključne riječi:

N2 metoda, metoda postupnog guranja, nelinearna statička metoda, pravilna zgrada, nepravilna zgrada

Subject review

Adriana Cerovečki, Ivan Kraus, Dragan Morić

N2 building design method

The N2 method is a fast nonlinear static method for the seismic design of buildings. This paper presents main properties and limitations of the method, its development over time, and possibilities of its application for different types of buildings. Differences between the traditional N2 method and its extensions are highlighted. Comparison of the N2 method with similar design approaches is also provided. The results obtained by calculations based on the N2 method are found to be in good agreement with the results obtained by much more complex methods. Guidelines for further research are given in the final part of the paper.

Key words:

N2 method, pushover method, nonlinear static method, regular building, irregular building

Übersichtsarbeit

Adriana Cerovečki, Ivan Kraus, Dragan Morić

Methode N2 für die Gebäudeplanung

N2 ist eine schnelle nicht lineare statische Methode für die Planung von erdbebensicheren Gebäuden. Die Abhandlung stellt die Merkmale und die Grenzen der Methode, deren Entwicklung sowie die Möglichkeiten der Anwendung an verschiedenen Gebäudetypen vor. Hervorgehoben werden die Unterschiede zwischen der klassischen N2 Methode und deren Erweiterungen. Des Weiteren wird ein Vergleich der N2 Methode und ähnlicher Berechnungsansätze dargelegt. Es wurde festgestellt, dass die Ergebnisse, die durch die Berechnung durch Anwendung der N2 Methode erhalten wurden, gut zu den Ergebnissen passen, die man durch die Anwendung wesentlich komplexerer Methoden erhalten hat. Am Ende werden Richtlinien für weitere Untersuchungen gegeben.

Schlüsselwörter:

N2 Methode, Methode der inelastischen statischen Untersuchung, nicht lineare statische Methode, rechteckiges Gebäude, nicht rechteckiges Gebäude

1. Uvod

S brzim napretkom računalne tehnologije, inženjerska praksa koristi sve naprednija računala, no traži i nove koncepte i alate koji će joj pružiti pouzdanije ponašanje konstrukcija. Čvrsta teorijska podloga o projektiranju protiv potresa uz primjenu nelinearne statičke metode za zgrade može se naći u knjigama koje je napisao Čaušević [1-3]. Nelinearna statička N2 metoda, koju su osmislili istraživači na Sveučilištu u Ljubljani kasnih 1980-th [4, 5] jednostavna je pružajući inženjerskoj praksi pouzdane rezultate za projektiranje. Ispitivanja provedena u ovom radu nastoje pružiti bolje razumijevanje o nelinearnoj statičkoj metodi, ali i istaknuti mogućnosti za daljnje istraživanje. U kasnim 1990-im [5] je prepoznata potreba za primjenom nelinearnog proračuna u protupotresnom projektiranju konstrukcija kako bi se u obzir uzela i kontrola oštećenja nastalih od djelovanja potresa. Ideja je bila povezati postupke iz različitih pristupa kako bi se postigao željeni rezultat [4-6]. Algoritam metode spektra kapaciteta pokazao se kao dobar pristup korak-po-korak, koji je kasnije primijenjen u N2 metodi. U ranoj fazi N2 metoda je koristila nelinearni dinamički proračun, koji je kasnije zamijenjen proračunom koji uključuje postupno guranje kako bi se metoda pojednostavnila [4, 7]. Dva spomenuta pristupa, naime metoda spektra kapaciteta i proračun uz primjenu postupnog guranja, vrlo dobro prihvaćena u praksi i teoriji konačno su objedinjena i tvore jednostavnu i brzu metodu koja daje rezultate vrlo slične drugim metodama, primjerice proračunu uz primjenu vremenskih zapisa. Iako se može reći da proračun uz primjenu vremenskih zapisa daje najtočnije rezultate, on je dugotrajan i zahtijeva proširen unos podataka. Stoga nije čest u svakodnevnom projektiranju, posebice u inženjerskoj praksi.

Euronorma 8 [8] predlaže nekoliko različitih pristupa za proračun konstrukcija otpornih na potres, počevši od najjednostavnijeg pristupa:

- proračun pomoću metode bočnih sila, za konstrukcije s dominantnim prvim oblikom osciliranja
- modalni proračun uz primjenu spektara odziva, koji se može primijeniti i za konstrukcije s višim oblicima osciliranja
- nelinearni statički proračun (postupnim guranjem)
- nelinearni dinamički proračun.

Prve dvije metode zasnivaju se na linearno elastičnom konstrukcijskom ponašanju, a zadnje dvije mogu pružiti uvid u neelastično ponašanje konstrukcija. Međutim, zadnje dvije metode su znatno zahtjevnije s obzirom na vrijeme i resurse. Euronorma 8 [8], objavljena 2004., uključuje N2 metodu kao jednu od mogućnosti za projektiranje zgrada, a postala je široko rasprostranjena izobrazbom građevinskih inženjera, no rijetko je primjenjivana u praksi. Do danas se N2 metoda primjenjuje za gotovo bilo koji tip zgrada (npr. [5, 9-12]). Međutim, neka ograničenja još uvijek postoje, ali o njima kasnije. S obzirom na zadani prostor, ovaj rad se isključivo odnosi na armiranobetonske (AB) zgrade. Osim toga, N2 metoda je također primijenjena na višekratnim križno lameliranim zgradama [13], čeličnim

konstrukcijama [12, 14] i mostovima [11, 15]. Krolo, Čaušević i Bulić [12, 16], uz primjenu N2 metode, istražili su doprinos krutosti čvorova u čeličnim konstrukcijama.

Poglavlja koja slijede pokazuju razvoj N2 metode kroz posljednja dva desetljeća, njezina ograničenja i primjenu, a donose i kratak pregled proširenja metode.

2. Razvoj N2 metode

Koliko je bilo moguće pratiti, početak razvoja N2 metode seže u kasne 1980-e [4]. U to vrijeme N2 metoda je bila predstavljena kao relativno jednostavna za pravilne zgrade koje predominantno osciliraju u jednome obliku. Metoda je sadržavala dva različita matematička modela i tri osnovna postupka nelinearnog proračuna:

- konstrukcija je modelirana kao sustav s više stupnjeva slobode (MDOF) podvrgnut nelinearnom statičkom proračunu
- MDOF sustav je dalje pretvoren u istovrijedni sustav s jednim stupnjem slobode (SDOF), temeljen na pretpostavci da se oblik deformiranja ne mijenja tijekom snažnog podrhtavanja
- najveći pomak je određen iz nelinearnog dinamičkog proračuna na istovrijednom SDOF sustavu.

Međutim, kao nelinearnom dinamičkom proračunu, preporučena je primjena neelastičnog spektra odziva. Valjanost metode je ispitana u kasnim 1980-im [4] koristeći rezultate:

- dobivene iz nelinearnih dinamičkih proračuna provedenih na MDOF modelima
- eksperimenata provedenih u Japanu. Usporedbe rezultata su pokazale dobro slaganje, što je metodu učinilo pouzdanom za korištenje.

U 2000-oj [5] je predstavljena najjednostavnija inačica N2 metode, dane su informacije o ograničenjima metode te su nabrojena moguća proširenja i preinake. Do toga vremena metoda je bila ograničena isključivo na okvirne konstrukcije. U ranim 1990-im N2 metoda je proširena kako bi uključivala učinke oštećenja zbog potresa prouzročenog postelastičnim ciklusima [6]. Treći postupak proširene metode uključivao je ulaznu energiju unesenu u SDOF sustav. Ovaj konstrukcijski parametar je odabran kako bi se N2 metoda upotpunila s obzirom na to da je neovisna o konstrukcijskom sustavu i jer se jednom dobivena iz SDOF sustava može koristiti kao dobra zamjena za ulaznu energiju MDOF sustava, no samo ako su učinci viših oblika zanemarivi. Proširena metoda je ispitana na dva numerička modela zasnovana na različitim konceptima:

- na konceptu jakog stupa-slabe grede
- na konceptu mekog kata opterećenim pomoću obrasca opterećenja obrnutog trokuta.

Rezultati dobiveni iz inačice N2 metode iz ranih 1990-ih uspoređeni su sa sličnima koji su dobiveni iz nelinearnog proračuna uz primjenu vremenskog zapisa. Ovo istraživanje pokazuje da:

- proširena metoda daje dobre rezultate za dimenzioniranje zgrada s mekim katovima
- da učinci viših oblika trebaju biti razmotreni ako je dominantni period osciliranja konstrukcije znatno viši od dominantnog perioda gibanja tla.

Međutim, dominantni period gibanja tla može biti poznat samo nakon završetka potresa i nakon što je gibanje tla zabilježeno i analizirano. Kada je riječ o dominantnom periodu gibanja tla, treba imati na umu da ne postoji jedinstvena i nepogrešiva metoda za njegovu procjenu. Predviđanje dominantnog perioda gibanja tla se može zasnivati na prethodnim protupotresnim događajima na lokaciji od interesa ili iz osnovnih perioda temeljnog tla. Ustvari, tlo može biti promatrano kao medij za amplifikaciju energije pri frekvencijama bliskim osnovnoj frekvenciji tla [17]. Rezultati dobiveni iz inačice N2 metode iz 1990-ih bili su promotreni u svjetlu dominantnog perioda i trajanja gibanja tla. No, ovi parametri su nestalni. Dominantni period gibanja tla je teško predvidjeti čak i na temelju prirodnog perioda temeljnog tla [17]. Štoviše, trajanje potresa je gotovo nepredvidivo. Međutim, informacije iz prethodnih potresa mogu biti korištene za kategoriziranje protupotresnog ulaznog opterećenja s obzirom na trajanje. Ta kategorizacija tada može biti primijenjena za proračun konstrukcija uslijed različitih trajanja.

AB konstrukcije koje su korištene za istraživanje ranijeg razvoja N2 metode [4-6, 18] bile su ravninske. Metoda je u to vrijeme provjerena pomoću eksperimenata i naprednije nelinearne dinamičke metode pokazavši nekonzervativne i pouzdane rezultate koji mogu poslužiti za dimenzioniranje. N2 metoda je također primijenjena na zgrade zasnovane na konceptu jakog stupa i slabe grede te konceptu mekog kata [18]. Rezultati dobiveni iz tih istraživanja uspoređeni su s rezultatima dobivenim iz nelinearnog dinamičkog proračuna pokazavši da N2 metoda bolje predviđa protupotresni odziv na globalnoj razini u odnosu na lokalnu razinu. No, još tada je bilo jasno da postoje određena ograničenja i nedostaci unutar metode. To su jasno istaknuli njezini tvorci, pa je razvoj nastavljen na istom tipu konstrukcija [9, 18-20]. Fajfar i suradnici [5, 11, 18, 19] pokazali su detaljan korak-po-korak algoritam N2 metode zajedno s poboljšanjima i pojednostavljenjima. Nesumnjivo, to je metodu učinilo razumljivijom za studente, znanost i praksu, a daljnji razvoj bržim i lakšim. Nakon približno 16 godina postojanja, provjerena u teoriji i praksi, N2 metoda je zaslužila svoje mjesto u europskim propisima za projektiranje konstrukcija otpornih na potrese [8].

Na početku 21. stoljeća napravljen je iskorak od pravilnih na nepravilne konstrukcije i pokazana je primjena postupka postupnog guranja na tlocrtno asimetrične zgrade [19-21]. Objasnjeno je kako u N2 metodu uključiti učinke viših oblika [22, 23]. Primjena N2 metode je pokazana za mostove [11] i zgrade na izolatorima [24-26]. Između ostalog, proširena N2 metoda za asimetrične zgrade pobliže je ispitana na setu koji se sastojao

od stvarnih zgrada [10, 27]. Ključni rezultati dobiveni iz tih istraživanja prikazani su sažeto u ovom radu.

3. Tijek provedbe N2 metode

Metodu potvrđuju podatci o konstrukciji i tlu, koji se koriste kako bi se odredili kapacitet konstrukcije i protupotresni zahtjev. Za potrebe uključivanja trošenja energije treba odrediti neelastični spektar primjenjujući nelinearni SDOF sustav temeljen na bilinearnoj vezi sila-pomak. Veza spektralnog pomaka S_d i spektralnog ubrzanja S_a prikazana je izrazom:

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} \cdot \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_a \quad (1)$$

gdje je:

T - prirodni period vibriranja zgrade

μ - koeficijent duktilnosti definiran kao omjer najvećeg pomaka i pomaka pri popuštanju

R_μ - faktor redukcije zbog histereznog trošenja energije unutar duktilne konstrukcije.

Faktor redukcije se može približno odrediti kao:

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \quad \text{za } T < T_c \quad (2)$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{za } T \geq T_c \quad (3)$$

gdje je:

T_c - period koji označava desni rub platoa spektra ubrzanja.

Izrazi (2) i (3) su korišteni u većini pregledane literature (npr. [5, 11, 19, 28, 29]). Osim toga, pronađeni su i sljedeći izrazi za redukcijski faktor u pregledanoj literaturi (npr. [17, 30]):

$$R_\mu = 1 \quad \text{za } T < T_B \quad (4)$$

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \quad \text{za } T_B \leq T < T_c \quad (5)$$

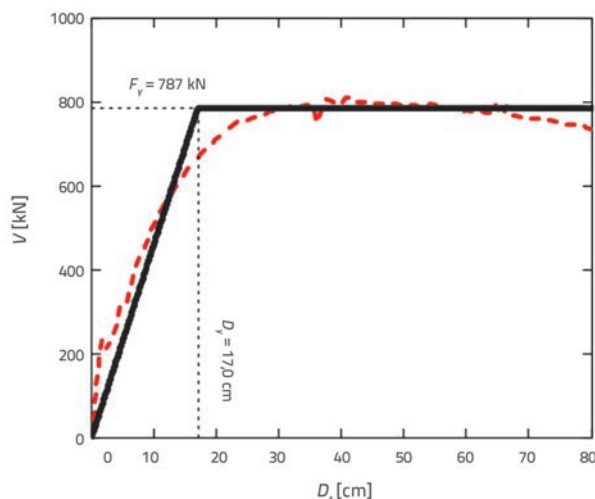
$$R_\mu = \mu \quad \text{za } T \geq T_c \quad (6)$$

gdje je:

T_B - period koji označava lijevi rub platoa spektra odziva ubrzanja.

Radi lakšega daljnijeg ocjenjivanja, svaki $\mu < 4$ se odnosi na zahtjev niske duktilnosti [5]. Kako bi se istražio kapacitet konstrukcije, nelinearni MDOF model je podvrgnut monotono rastućem horizontalnom opterećenju, koje uzrokuje postupnu plastifikaciju konstrukcijskih elemenata. Ovim postupkom se dobiva nelinearna krivulja koja pokazuje odnos između poprečne sile u podnožju i vršnog pomaka. Ta krivulja daje informaciju o krutosti, čvrstoći i duktilnosti. Zapravo, odnos sila-pomak može

biti određena za svaki kat zgrade. Horizontalno opterećenje može biti dodano na model koristeći proizvoljan obrazac. Ipak, nekoliko posebno određenih obrazaca je preporučeno u literaturi (npr. [4-7, 9, 18, 28]). Pretvorba MDOF modela u istovrijedan SDOF sustav zasniva se na podacima iz bilinearne aproksimacije krivulje kapaciteta (slika 1.).



Slika 1. Krivulja kapaciteta [28]: stvarna krivulja u punoj liniji i idealizirana krivulja u crtkanoj liniji; V je poprečna sila u podnožju zgrade, a D_t vršni pomak

Period vibracija istovrijednog SDOF sustava je određen izrazom

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \quad (7)$$

gdje je:

m^* - masa istovrijednog SDOF sustava

D_y^* i F_y^* - pomak i poprečna sila u podnožju SDOF sustava pri popuštanju.

Masa se proračunava kao

$$m^* = \sum m_i \Phi_i^2 \quad (8)$$

gdje je:

m_i - masa

Φ_i - vektor pomaka i -te razine promatranog MDOF sustava.

Pomak D^* istovrijednog SDOF sustava se procjenjuje prema izrazu

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (9)$$

gdje su:

D_t i Γ - vršni pomak MDOF sustava i koeficijent koji kontrolira pretvorbu.

Poprečna sila u podnožju zgrade F^* istovrijednog SDOF sustava procjenjuje se pomoću izraza

$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad (10)$$

gdje je:

V - poprečna sila u podnožju MDOF sustava.

Zajednički nazivnik Γ se određuje prema izrazu

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad (11)$$

Bilinearno pojednostavljenje krivulje kapaciteta obično se prilagođava odoka i na osnovi inženjerske prosudbe [5, 7, 9, 11, 19, 31]. Ipak, moguće je pronaći i korisne smjernice za bilinearno pojednostavljenje u [31]. Međutim, krutost nakon tečenja treba biti jednaka nuli [5]. Postupak pretvorbe MDOF sustava u istovrijedan SDOF sustav predložili su japanski istraživači [32]. Oni su ispitali postupak na setu koji je sadržavao AB i čelične zgrade različitih visina. Istraživanje je pokazalo da postupak daje dobre rezultate za AB i čelične zgrade koje nemaju više od 10 katova, bez obzira na tip primijenjenog nosivog sustava. Ciljani pomak vrha MDOF sustava se procjenjuje množenjem zahtijevanog spektralnog pomaka istovrijednog SDOF sustava s koeficijentom pretvorbe Γ . Konačno, lokalni protupotresni zahtjev i procjena oštećenja MDOF sustava određuju se postupkom postupnog guranja. Tim se postupkom MDOF sustav gura sve dok vršni pomak ne dosegne ciljani pomak. Sve to daje informaciju o lokalnim zahtjevima, međukratnom pomaku i, između ostalog, slijedu nastajanja plastičnih zglobova.

4. O sastavnim dijelovima i svojstvima N2 metode

Ovo poglavlje razmatra sastavne dijelove N2 metode zajedno s ključnim učincima koji utječu na rezultate i koji upravljaju projektiranjem.

4.1. Plastični zglobovi

Plastični zglobovi se često koriste na krajevima konstrukcijskih elemenata kako bi se uključilo nelinearno ponašanje u model. Presudan postupak prije provođenja proračuna uz postupno guranje odnosi se na ispravno definiranje plastičnih zglobova. Međutim, utvrđivanje područja podložnih stvaranju zglobova često nije jednostavno. Štoviše, često se zasniva na bilinearnoj ili trilinearnoj vezi momenta i kuta rotacije [5, 11, 25, 26, 33]. Osim u [20, 26], svojstva zglobova korištenih u proračunima u drugim su radovima prikriivena.

4.2. Metoda postupnog guranja

Postupno guranje je sastavni dio N2 metode i jedan od najvažnijih postupaka. Krivulja kapaciteta dobivena iz tog postupka

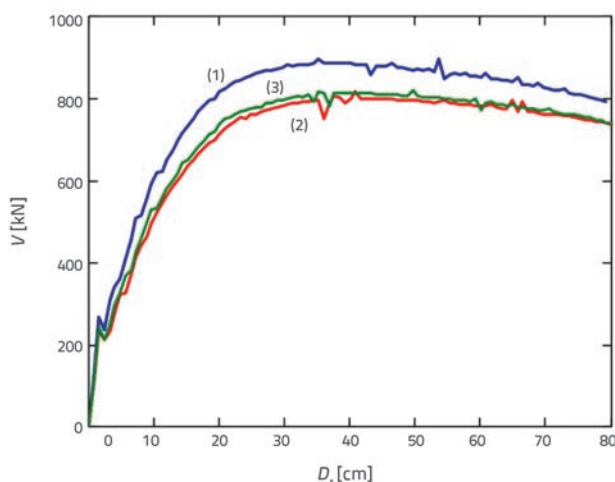
zahtijeva inženjersku prosudbu jer treba biti aproksimirana na bilinearan (ili trilinearan) način. To može biti kamen spoticanja jer drugačiji računalni programi za konstrukcijsko projektiranje nude drugačije definicije plastičnih zglobova. Osim toga, različito definirani plastični zglobovi zahtijevaju različite setove parametara koje često nije lako procijeniti. U kasnim 1990-im [34] predloženo je da primjena postupnog guranja treba biti ograničena samo na zgrade s malim i srednje dugim periodima. Ovaj problem je ponovno istaknut 2000. godine [5].

4.3. Obrasci raspodjele horizontalnog opterećenja

Obrazac horizontalnog opterećenja imitira protupotresne inercijalne sile u središtu mase svakog kata konstrukcije i ne postoji jedinstven način pomoću kojega bi se definirao. Tri su različita obrasca opterećenja koja se često primjenjuju:

- trokutasti
- jednoliki
- modalni.

Najčešće se primjenjuju jednoliki obrazac i obrazac obrnutog trokuta [4, 6, 7, 18, 35]. U novom istraživanju [26] primijenjena je raspodjela proporcionalna masi. Na osnovi dvaju opširnih istraživanja [5, 34], odabir obrasca horizontalnog opterećenja je važniji nego odabir ciljanog pomaka. Ta su istraživanja pokazala da je problem vezan za obrazac horizontalnog opterećenja jedna od najslabijih točaka metode postupnog guranja, a tako ujedno i N2 metode. Mitrović i Čaušević [28] koristili su tri različita oblika pomaka za raspodjelu horizontalnih sila: jednoliku, trokutastu i modalnu te su pokazali da svi obrasci daju slične rezultate (slika 2.). Krawinkler [34] i Fajfar [5] su predložili primjenu najmanje dva različita obrasca opterećenja tijekom procesa projektiranja. Naime, niti jedan od obrazaca opterećenja ne može u obzir uzeti preraspodjelu sila unutar zgrade. Štoviše, različiti lokalni mehanizmi se mogu uočiti primjenom različitih obrazaca opterećenja.



Slika 2. Usporedba krivulja kapaciteta dobivenih za isti MDOF sustav na osnovi tri različite raspodjele opterećenja [28]: (1) jednolike; (2) trokutaste; (3) modalne

4.4. Ciljani pomak

Ciljani pomak je u kasnim 1990-im istaknut kao jedan od problema u N2 metodi. Krawinkler [34] je istaknuo da ciljani pomak ovisi o prethodno odabranom obliku vektora te također da ciljani pomak nije unaprijed poznat. Stoga je iteracijski postupak neizbježan. U početnim danima razvoja N2 metode bilo je jasno da konstrukcijska oštećenja uzrokovana potresima nisu isključivo uvjetovana najvećim pomakom vrha [4]. Istraživanje iz kasnih 1990-ih [7] je pretpostavilo ciljani pomak koji je jednak jedan posto visine zgrade. Ciljani pomak može, između ostalog, biti u funkciji torzijskih učinaka, brojnih postelastičnih ciklusa i podizanja temelja. To su potvrdili i drugi istraživači (npr. [6, 31, 34]).

4.5. Faktor redukcije

Faktor redukcije, obično definiran na bilinearan način (npr. [7, 11]), izražava se kao omjer zahtijevane elastične čvrstoće i čvrstoće pri tečenju. Definicija tog faktora zahtijeva poznavanje perioda promatrane konstrukcije, ali i perioda koji označava desni rub platoa spektra ubrzanja. Međutim, rubni period postoji samo kod normiranog spektra odziva, koji je izveden na osnovi iskustva i tehnike zaglađivanja [30, 36]. S druge strane, ne postoji jedinstvena metoda za procjenu perioda osciliranja konstrukcije, npr. [37-41].

4.6. P-delta učinci

P-delta učinci nisu razmatrani u ranijim istraživanjima tijekom razvoja N2 metode (npr. [4, 6]), ali niti novijim istraživanjima nije na njih usmjerena veća pozornost. Ipak, važno je naglasiti da P-delta učinci mogu povećati zahtijevanu duktilnost i međukatne pomake [34]. Poznato je da su P-delta učinci izraženiji kod nižih katova konstrukcija, gdje se javljaju najveće vertikalne sile [34]. Štoviše, P-delta učinci mogu utjecati na povećanje osnovnog perioda osciliranja konstrukcije i uzrokovati dodatne momente prevrtanja [33, 42].

4.7. Medij za temeljenje

Osim ocjene kapaciteta i određivanja potencijalnih zona plastičnih zglobova, N2 metoda se može primijeniti i za procjenu ponašanja cjelokupnih sustava tlo-konstrukcija. Prema [5], utjecaj tla se može zanemariti kada su brzine posmičnih valova veće od 180 m/s. Međutim, jasno je da se temeljni sustav treba modelirati ako se očekuje njegovo popuštanje ili se sumnja na podizanje. To je potvrdio i Krawinkler [34]. Isključite li se istraživanja koja obuhvaćaju sustave za izolaciju i radovi [17, 43, 44], u svim ostalim istraživanjima, pa i u ovom radu, promatraju se zgrade kruto pričvršćene u nedeformabilni medij. Međutim, da bi N2 metoda postala primjenjiva za sustave tlo-konstrukcija, potrebno je dodatno istražiti neelastične spektre zahtjeva za meka tla te za potrese u blizini rasjeda [5]. Poznato

je da su niske zgrade temeljene na mekim tlima najosjetljivije na protupotresne učinke međudjelovanja tlo-konstrukcija [17]. No, pravilo jednakih pomaka sadržano u N2 metodi sugerira da je metoda manje prikladna za zgrade s kratkim periodima osciliranja temeljenim na mekim tlima [5]. Stoga je razumljivo što ostavlja prostor za daljnje istraživanje.

5. Usporedba N2 metode s drugim sličnim metodama

Osim N2 metode postoje i druge vije koje koriste slične principe: metoda spektra kapaciteta definirana u ATC-40 propisima te njezina poboljšana inačica sadržana u FEMA 440; metoda koeficijenata i nelinearni statički postupak dani u FEMA 273 te poboljšana inačica u FEMA 356. Skupina hrvatskih istraživača koju je vodio profesor Čaušević provela je istraživanja [9, 28] te usporedila N2 metodu s metodama definiranim u FEMA-i i ATC propisima. Oni su pokazali da:

- sve tri metode koriste postupak postupnog guranja, iako postoje različiti postupci za definiranje ciljanog pomaka
- postoji potreba za idealizacijom krivulje kapaciteta u bilinearnu krivulju za sve tri metode
- rezultati ATC metode nužno se ne podudaraju kada se koriste stvarni spektri odziva, ali isto tako moguća su višestruka rješenja
- ATC metoda može dati rezultate koji se razlikuju i do 50 % kada se usporede s nelinearnim dinamičkim proračunom u vremenu
- sve tri promatrane metode daju sličan najveći vršni pomak ako je raspodjela horizontalnog opterećenja u obliku obrnutog trokuta
- jednolika raspodjela horizontalnog opterećenja daje najveći vršni pomak koji se može razlikovati i do 60% ovisno o primjenjenoj metodi
- metode u ATC-u i FEMA-i ne povezuju raspodjelu horizontalnog opterećenja i oblik pomaka, ali zato u N2 metodi oblik pomaka utječe na raspodjelu horizontalnog opterećenja.

Talijanska grupa autora [29] također je napravila usporedbu N2 metode s metodom spektra kapaciteta. Oni su ustanovili sljedeće:

- N2 metoda je vezana za duktilnost, a metoda spektra kapaciteta veže se uz trošenje energije unutar konstrukcije
- N2 metoda koristi tangentni osnovni period osciliranja, a metoda spektra kapaciteta koristi sekantni osnovni period osciliranja
- metoda spektra kapaciteta podcjenjuje veličine pomaka za sustave s izraženim trošenjem energije.

Lagaros i Fragiadakis [45] su na osnovi niza niskih i srednje visokih AB zgrada pravilnog i nepravilnog tlocrta pregledali i usporedili sljedeće metode:

- metodu koeficijenata pomaka danu u ASCE-41
- metodu spektra kapaciteta danu u ATC-40
- N2 metodu.

Ustanovili su:

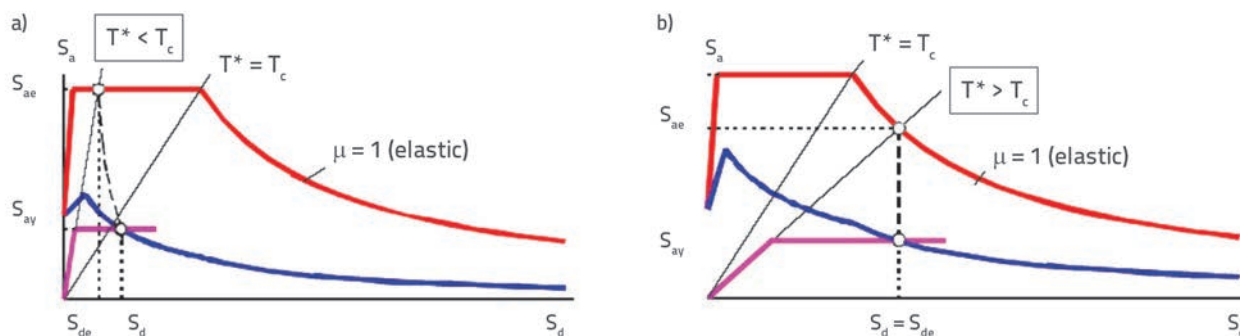
- ATC metoda precjenjuje protupotresni zahtjev, dok su razlike između N2 i ASCE metode male
- ATC metoda sadrži veće zahtjeve za niske pravilne građevine u odnosu na N2 i ASCE metodu.

Kada se usporede N2 i metoda spektra kapaciteta, one za razliku od nelinearnog statičkog postupka omogućavaju grafički prikaz rezultata [9, 18, 28]. Primjerice, zahtijevani spektar na konstrukciju te dijagram kapaciteta mogu biti prikazani na istome grafu (slika 3.). Kako bi se izradila ovojnica najvećih protupotresnih zahtjeva na konstrukciju, FEMA i europske norme preporučuju povećanje ciljanog pomaka za 150 % [5, 8, 9].

6. N2 metoda za nepravilne zgrade te zgrade na izolatorima

Poznato je da torzijski učinci mogu povećati pomake i da se torzijske rotacije mogu promijeniti iz smjera kretanja kazaljke na satu u smjer suprotan od kretanja kazaljke na satu i obrnuto, što izaziva stvaranje plastičnih zglobova na nosivim elementima [7].

U kasnim 1980-im istaknuto je da su učinci viših oblika osciliranja značajniji na ukupnu poprečnu silu u podnožju zgrade nego za vršni pomak i moment prevrtanja [4]. Kasnije



Slika 3. Elastični (crveno) i neelastični (plavo) zahtijevani spektar s obzirom na spektra kapaciteta (ljubičasto) za [9]: a) zgrade s kratkim periodom osciliranja; b) zgrade sa srednje dugim i dugim periodom osciliranja

je istaknuto [5] da se učinci viših oblika mogu uzeti u obzir ovojnicom rezultata dobivenih primjenom različitih obrazaca horizontalnog opterećenja. Do 2000. godine N2 metoda je korištena samo za procjenu protupotresnog ponašanja jednostavnih i simetričnih konstrukcija. Daljnje istraživanje je proširilo N2 metodu za primjenu na nepravilne upete zgrade te zgrade na izolatorima. Ovo poglavlje daje više detalja o tim tipovima sustava.

6.1. Tlocrtna asimetričnost

U kasnim 1990-im [34] postalo je jasno kako je potrebno istražiti uključivanje torzijskih učinaka zajedno s postupkom postupnog guranja. Korak naprijed napravila je grupa slovenskih znanstvenika 2005. [19] kada je N2 metoda proširena na asimetrične konstrukcije. Detaljni prikaz koark-po-korak algoritma dan je u [19], koji nadopunjuje algoritam opisan u prethodnom u poglavlju ovog rada. Ukratko, proširena N2 metoda koristi isti postupak pretvorbe MDOF sustava u SDOF za simetrične i asimetrične zgrade. Proširena N2 metoda koristi korekcijske faktore koji se primjenjuju na rezultatima iz postupka postupnog guranja. Korekcijski faktori se određuju kao omjer normaliziranih vršnih pomaka dobivenih elastičnim modalnim proračunom i postupnim guranjem, posebno za dva horizontalna smjera - pozitivan i negativan.

Proširena metoda N2 za zgrade asimetričnog tlocrta provjerena je s obzirom na rezultate dobivene iz nelinearnog dinamičkog proračuna. U tom istraživanju eksperimentalno je ispitana trokatna AB okvirna zgrada s ekscentričnošću jednakim približno 12 %. Usporedba rezultata je pokazala da je proširena N2 metoda na strani sigurnosti i da daje konzervativne rezultate. Slovenska skupina istraživača je istaknula kako je za torziju koja se javlja u zgradama asimetričnog tlocrta karakteristična velika nesigurnost slučajnost. Također istaknuli su da na rezultate utječu postupno guranje i linearni dinamički proračun. Fajfar, Marušić i Peruš [19] objasnili su konzervativnost kao posljedicu poteškoća pri određivanju ciljanog pomaka u težištu mase te utjecaja torzijskih učinaka. Bhatt i Bento [10] pobliže su testirali proširenu N2 metodu za zgrade asimetričnog tlocrta uz primjenu stvarnih AB zgrada s tri, pet i osam katova. Usporedili su rezultate dobivene primjenom proširene i standardne N2 metode s rezultatima iz nelinearnog dinamičkog proračuna i potvrdili dobru podudarnost proširene metode u predviđanju torzijskog ponašanja zgrada asimetričnih u tlocrtu. Skupina talijanskih istraživača [20] je uključila slučajnu ekscentričnost u proširenu inačicu N2 metode. Oni su proveli istraživanje na trokatnoj AB okvirnoj zgradi i razvili su tri različite metode koje omogućavaju uključivanje slučajne ekscentričnosti u N2 metodu. Međutim, razvijene metode ne primjenjuju se jednostavno, što su također istaknuli i autori metode. Konačno, Kilar i Koren [25] su pokazali primjenu N2 metode na zgradama asimetričnim u tlocrtu koje su temeljene na izolatorima. Najvažniji rezultati ovog istraživanja dani su na kraju ovog poglavlja.

6.2. Uključivanje učinaka viših oblika

U ranijem je istraživanju [6] prigušenje proporcionalno masi korišteno kako bi se simulirali učinci viših oblika. Nakon što je metoda N2 uspješno primijenjena na zgrade asimetričnog tlocrta, razvijeno je proširenje za zgrade nepravilne po visini radi uključivanja učinaka viših oblika [22, 23]. Sličan pristup zasnovan na korekcijskim faktorima i primijenjen u proširenoj N2 metodi za zgrade nepravilnog tlocrta poslužio je za uključivanje učinaka viših oblika. Taj pristup pretpostavlja da su učinci viših oblika isti u neelastičnom i u elastičnom području. Doprinos viših oblika dobiven je iz elastičnog modalnog proračuna. On se poslije koristi za korekciju rezultata dobivenih postupnim guranjem. Predloženi postupak je sljedeći:

- provesti standardnu N2 metodu
- provesti elastični modalni proračun radi utvrđivanja relevantnih oblika i međukatnih pomaka
- odrediti ovojnicu rezultata iz prethodna dva postupka, definirati korekcijske faktore i međukatne pomake za svaki kat
- odrediti lokalne veličine.

Korekcijski faktori su definirani kao omjer između normaliziranog pomaka krova dobivenog elastičnim modalnim proračunom i rezultatima dobivenih pomoću proračuna postupnim guranjem. Vrijednost faktora korekcije koristi se samo ako je veća od 1. Konačni rezultati dobiveni su množenjem rezultata N2 metode s odgovarajućim korekcijskim faktorima. Najveći doprinos viših oblika uočava se za više katove.

6.3. Izolacija temelja

Građevine temeljene na mekom mediju predominantno osciliraju u jednom obliku. Kilar i Koren [24-26, 46] prvi su predložili primjenu N2 metode na zgrade na izolatorima kako bi, između ostalog, olakšali postupak odabira izolacijskih sustava. Konstrukcije na izolatorima predominantno osciliraju u jednom obliku, koji u biti ostaje nepromijenjen pri različitim intenzitetima potresa i time dobro ispunjava glavne zahtjeve N2 metode. U takvom slučaju se cijela konstrukcija iznad izolatora može promatrati kao koncentrirana masa na stupu SDOF sustava. Primjenom N2 metode, ciljani pomak se može odrediti istim postupkom koji je definiran za upete konstrukcije. Osim izolacijskih sustava, Kilar i Koren su proučavali ponašanje konstrukcija temeljenih na XPS sloju [47]. Jedno od prvih njihovih istraživanja [26] pokazalo je da krući i visoko prigušeni izolatori rezultiraju manjim pomacima temelja kada se usporede s mekšim i nisko prigušenim izolatorima. Plastifikacija elemenata gornjeg ustroja je uočena samo za izolatore s tvrdom gumom te izolatore s normalnom gumom i vrlo slabim prigušenjem. Koeficijent Γ , koji kontrolira pretvorbu bio je jednak 1. Prošireno istraživanje [24] uključivalo je novu trilinearnu aproksimaciju krivulje kapaciteta umjesto primjene bilinearne aproksimacije. Pretpostavljen je konstantan faktor redukcije koji obuhvaća:

- nelinearno ponašanje i prigušenje gornjeg ustroja konstrukcije
- smanjenje čvrstoće zbog većeg prigušenja izolatora.

Nova predložena metoda ispitana je na stvarnoj četverkatnoj zgradi pravilnog tlocrta, primjenjujući tri različite vrste izolatora i tri različite raspodjele horizontalnog opterećenja. Tada je koeficijent Γ imao vrijednosti između 1,04 i 1,41, ovisno o vrsti izolatora i korištenoj raspodjeli horizontalnog opterećenja. Ispitivanje je pokazalo:

- dobro poklapanje rezultata dobivenih primjenom dorađene N2 metode i nelinearnog dinamičkog proračuna
- podcjenjivanje zahtijevanih pomaka kada se primjenjuje trokutasta raspodjela horizontalnog opterećenja.

Kilar i Koren [24] su za zgrade na izolatorima preporučili primjenu raspodjele horizontalnog opterećenja proporcionalnog masi. Njihovo sljedeće istraživanje je provedeno na asimetričnoj izoliranoj zgradi [25] koristeći istu trilinearnu aproksimaciju krivulje kapaciteta, nadograđenu inačicu redukcijskog faktora, ali i torzijski korekcijski faktor. Istraživanje je pokazalo dobro podudaranje rezultata dobivenih metodom N2 i nelinearnim dinamičkim proračunom ako ekscentričnost ne prelazi 20 % dužine veće dimenzije tlocrta. U suprotnom, N2 metoda podcjenjuje pomake. Daljnjim se istraživanjem potvrdilo da je za izolirane zgrade raspodjela horizontalnog opterećenja proporcionalna masi prikladnija nego trokutasta raspodjela.

7. Zaključak

N2 je jednostavna i brza nelinearna metoda za protupotresni proračun pravilnih i nepravilnih zgrada. Nastala je na Sveučilištu u Ljubljani, gdje je skupina istraživača predložila algoritam za metodu koja pruža jednostavan i brz uvid u protupotresno ponašanje zgrada. Do danas je metoda vrlo precizno ispitana i poboljšana uvođenjem nelinearnog statističkog proračuna postupnim guranjem, različitih faktora korekcije radi uključivanja učinaka viših oblika i tlocrtne asimetrije, ali i postupaka za procjenu ponašanja zgrada

na izolatorima. Metoda je uspoređena s drugim sličnim metodama koje su pronađene u američkim smjernicama i normama: FEMA 273, FEMA 356 i FEMA 440, ATC-40 i ASCE-41. Provedena istraživanja su pokazala da N2 metoda i američke metode zapravo daju slične rezultate, iako se u nekim postupcima zasnivaju na različitim pretpostavkama i pristupima. N2 metoda je zaokupila interes mnogih istraživača zbog svoje jednostavnosti i mogućnosti pružanja razumno točnih rezultata u usporedbi s naprednijim i vremenski zahtjevnijim metodama, kao što je npr. nelinearna dinamička metoda. Štoviše, N2 metoda nudi grafički prikaz rezultata, što nedostaje ostalim metodama danim u američkim smjernicama i normama. Iako N2 metoda ima mnoge prednosti, još uvijek nije potpuno istražena, primjerice u sklopu drvenih i zidanih konstrukcija. Iako zidane zgrade čine najveći dio fonda svjetskih zgrada [48], u većini slučajeva u inženjerskoj praksi je zidani ispun zanemaren u proračunima. Sva ispitivanja prikazana u ovom radu pretpostavljaju krute dijafragme. Međutim, mnoge stare, zidane i kamene građevine imaju djelomično krute horizontalne dijafragme. Kilar i Koren [49] su nedavno proveli istraživanje o tome i ispitali primjenjivost N2 metode na zidanu konstrukciju. Nadalje, učinci popustljivosti tla, učinci međudjelovanja tla i konstrukcije te dodatni P-delta učinci, koji mogu povećati momente prevrtanja i koji mogu imati važnu ulogu kod konstrukcija temeljenih na mekim tlima, zahtijevaju dodatnu pozornost u sklopu N2 metode. Osim toga, modeliranje plastičnih zglobova i aproksimacija krivulje kapaciteta smatraju se Ahilovom petom N2 metode za inženjersku praksu, posebno u projektiranju novih zgrada. Ipak, N2 metoda ima potencijal da postane vrhunski i svakodnevno korišteni alat u inženjerskoj praksi za protupotresno projektiranje konstrukcija novih zgrada i protupotresnu procjenu postojećih zgrada.

Zahvala

Ovaj rad je proveden u okviru projekta "Pendularum" i potpomognut financijskom potporom br. 15-04 Građevinskog fakulteta Osijek.

LITERATURA

- [1] Čaušević, M.: Protupotresno inženjerstvo: (odabrana poglavlja), Školska knjiga, Zagreb, 2001.
- [2] Čaušević, M.: Dinamika konstrukcija: diskretni sustavi, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [3] Čaušević, M.: Dinamika konstrukcija-Protupotresno inženjerstvo, aerodinamika, konstrukcijske euronorme, Golden marketing-Tehnička knjiga, Zagreb, 2010.
- [4] Fajfar, P., Fischinger, M.: N2-a method for non-linear seismic analysis of regular buildings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, pp. 111-116, 1988.
- [5] Fajfar, P.: A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design, Earthquake Spectra, Earthquake Spectra, 16, pp. 573-592, 2000, <https://doi.org/10.1193/1.1586128>
- [6] Gašperšič, P., Fajfar, P., Fischinger, M.: An approximate method for seismic damage analysis of buildings, Earthquake Engineering Tenth World Conference, Rotterdam, pp. 3921-3926, 1992.
- [7] Kilar, V., Fajfar, P.: Simple push-over analysis of asymmetric buildings, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26, pp. 233-249, 1996, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199702\)26:2<233::AID-EQE641>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199702)26:2<233::AID-EQE641>3.0.CO;2-A)

- [8] EN 1998-1 (English): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC), 2004.
- [9] Čaušević, M., Zehenter, E.: Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004, GRAĐEVINAR, 59 (2007), pp. 767-777.
- [10] Bhatt, C., Bento, R.: Assessing the seismic response of existing RC buildings using the extended N2 method, Bulletin of Earthquake Engineering, 9 (2011), pp. 1183-1201.
- [11] Fajfar, P., Fischinger, M., Isaković, T.: Metoda procjene seizmičkog ponašanja zgrada i mostova, GRAĐEVINAR, 52 (2000), pp. 663-671.
- [12] Krolo, P., Čaušević, M., Bulić, M.: The extended N2 method in seismic design of steel frames considering semi-rigid joints, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, 2014.
- [13] Šusteršić, I., Fragiaco, M., Dujić, B.: Influence of connection properties on the ductility and seismic resistance of multi-storey cross-lam buildings, CIB-W18, Italy, 2011.
- [14] Petrović, S., Kilar, V.: Effects of Horizontal and vertical mass-asymmetric distribution on the seismic response of a high-rack steel structures, Advances in Structural Engineering, 15 (2012), pp. 1977-1988, <https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.11.1977>.
- [15] Isaković, T., Fischinger, M.: Simplified nonlinear method for the analysis of concrete bridges, GRAĐEVINAR, 61 (2009), pp. 625-633.
- [16] Krolo, P., Čaušević, M., Bulić, M.: Nelinearna seizmička analiza čeličnog okvira s djelomično krutim priključcima, GRAĐEVINAR, 67 (2015) 6, pp. 573-583.
- [17] Kraus, I.: Spektri protupotresnog odziva plitko temeljenih konstrukcija na mekim tlima, PhD thesis, 2014.
- [18] Fajfar, P., Gašperšić, P.: The N2 method for seismic damage analysis of RC buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25 (1996), pp. 31-46, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199601\)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V)
- [19] Fajfar, P., Marušić, D., Perušić, I.: The extension of the N2 method to asymmetric buildings, 4th European workshop on the seismic behaviour of irregular and complex structures, Thessaloniki, 2005.
- [20] Magliulo, G., Maddaloni, G., Eduardo, C.: Extension of N2 method to plan irregular buildings considering accidental eccentricity, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43 (2012), pp. 69-84, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.032>
- [21] Chopra, A.K., Goel, R.K.: A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33 (2004), pp. 903-927, <https://doi.org/10.1002/eqe.380>
- [22] Kreslin, M., Fajfar, P.: The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40 (2011), pp. 1571-1589, <https://doi.org/10.1002/eqe.1104>
- [23] Kreslin, M., Fajfar, P.: The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation, Bulletin of Earthquake Engineering, 10 (2012), pp. 695-715, <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9319-6>
- [24] Kilar, V., Koren, D.: Simplified inelastic seismic analysis of base-isolated structures using the N2 method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39 (2010), pp. 967-989.
- [25] Kilar, V., Koren, D.: Usability of pushover analysis for asymmetric base-isolated buildings, COMPDYN, Corfu, Greece, 2011.
- [26] Kilar, V., Koren, D.: Usage of simplified N2 method for analysis of base isolated structures, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [27] Bhatt, C., Bento, C.: Comparison of Nonlinear Static Methods for the Seismic Assessment of Plan Irregular Frame Buildings with Non Seismic Details, Journal of Earthquake Engineering, 16 (2012), pp. 15-39, <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.586085>
- [28] Mitrović, S., Čaušević, M.: Nelinearni statički seizmički proračuni konstrukcija, GRAĐEVINAR, 61 (2009) 6, pp. 521-531.
- [29] Amadio, C., Rinaldin, G., Fragiaco, M.: Investigation on the accuracy of the N2 method and the equivalent linearization procedure for different hysteretic models, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 83 (2016), pp. 69-80, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.01.005>
- [30] Gazetas, G.: Should elastic response spectra be the basis of seismic design of strongly inelastic and soft-soil-structure systems?, Proceedings of the 3rd International Symposium on Advances in Urban Safety, Nadjing, China, 2012.
- [31] Priestley, M.J.N.: Performance based seismic design, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, pp.1-22, 2000.
- [32] Kuramoto, H. et al.: Predicting the earthquake response of buildings using equivalent single degree of freedom system, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, pp. 1-8, 2000.
- [33] Pettinga, D., Priestley, N.: Accounting for P-Delta Effects in Structures When Using Direct Displacement-Based Design, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, pp. 1-8, 2008.
- [34] Krawinkler, H.: Pushover Analysis: Why, How, When, and When Not to Use It, Structural Engineers Association of California, Maui, Hawaii, pp. 17-36, 1996.
- [35] Korpar, B.: Ocena uporabivosti N2 metode na tipično AB stenasto stavbo, Master of Science Thesis, 2012.
- [36] Ziotopoulou, A., Gazetas, G.: Are Current Design Spectra Sufficient for Soil-Structure Systems on Soft Soils? (Chapter), ACES Workshop, eds. M.N. Fardis, Springer, pp. 79-87, 2010.
- [37] Hadzima-Nyarko, M. et al.: Comparison of fundamental periods of reinforced shear wall dominant building models with empirical expressions, Technical Gazette, 22 (2015), pp. 658-694, <https://doi.org/10.17559/TV-20140228124615>
- [38] Draganić, H., Hadzima-Nyarko, M., Morić, D.: Comparison of RC frames periods with the empiric expressions given in Eurocode 8, Technical Gazette, 17 (2010), pp. 93-100.
- [39] Crowley, H., Pinho, R.: Period-height relationship for existing European reinforced concrete buildings, Journal of Earthquake Engineering, 8 (2004), pp. 93-119, <https://doi.org/10.1080/13632460409350522>
- [40] Gallipoli, M.R. et al.: Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings, Bulletin of Earthquake Engineering, 8 (2010), pp. 593-607, <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9133-6>
- [41] Guler, K., Yuksel, E., Kocak, A.: Estimation of the Fundamental Vibration Period of Existing RC Buildings in Turkey Period of Existing RC Buildings in Turkey Utilizing Ambient Vibration Record, Journal of Earthquake Engineering, 12 (2008), pp. 140-150, <https://doi.org/10.1080/13632460802013909>
- [42] Davidson, B.J., Fenwick, R.C., Chung, B.T.: P-delta effects in multi-storey structural design, Earthquake Engineering Tenth World Conference, Rotterdam, pp. 3847-3852, 1992.

- [43] Mekki, M., Elachachi, S.M., Breyse, D., Nedjar, D., Zoutat, M.: Soil structure interaction effects on RC structures within a performance-based earthquake engineering framework, *European Journal of Earthquake and Civil Engineering*, 18 (2014), pp. 945-962.
- [44] Pardžiković, M., Kraus, I., Hadzima-Nyarko, M.: Application of simplified nonlinear N2 method for seismic analysis of soil-structure interaction, 15th Symposium on Earthquake Engineering, Roorkee, 2014.
- [45] Lagaros, N.D., Fragiadakis, M.: Evaluation of ASCE-41, ATC-40 and N2 static pushover methods based on optimally designed buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31 (2011), pp. 77-90, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.08.007>
- [46] Kilar, V., Petrovčič, S., Šilih, S., Koren, D.: Financial aspects of a seismic base isolation system for a steel high-rack structure, *Informes de la Construction*, 65 (2013), pp. 533-543, <https://doi.org/10.3989/ic.12.067>
- [47] Koren, D., Kilar, V.: Seismic vulnerability of reinforced concrete building structures founded on an XPS layer, *Earthquakes and Structures*, 10 (2016), pp. 939-963, <https://doi.org/10.12989/eas.2016.10.4.939>
- [48] D'Ayala, D.: Assessing the seismic vulnerability of masonry buildings, *Handbook of seismic risk analysis and management of civil infrastructure systems*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 334-365, 2013.
- [49] Petrovčič, S., Kilar, V.: Modelling and analysis of seismic base-isolated masonry heritage structures, *SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, Cambridge, pp. 1-10, 2015.